УДК 621.565

Повышение энергоэффективности холодного хранилища*Лекомцев П.Л., Исупов Р.Ю.**Ижевская государственная сельскохозяйственная академия***Аннотация**

Сбережение ресурсов и энергии в холодильных системах является одним из основных векторов развития народного хозяйства нашей страны. Одним из перспективных путей решения этих проблемы является применение энергоэффективных холодильных машин. В статье рассмотрены основные вопросы по организации энергоэффективного хранилища. В частности, приведены основные рекомендации по проектированию здания хранилища; приведен анализ энергоэффективности холодильных машин с применением ЧРП (частотно регулируемый привод) и без; рассмотрены основные аспекты работы конденсатора холодильной установки.

Ключевые слова: ГОДОВОЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ, РЕГУЛИРОВАНИЕ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Актуальность

Особую значимость приобретает проведение оценки и повышение эффективности холодильных систем в режимах частичной нагрузки, благодаря чему в условиях постоянного роста цен на электроэнергию можно получить существенную экономическую выгоду.

Материалы и методика

Общие рекомендации по организации холодных хранилищ выведены путем библиографического анализа тематической литературы.

Для оценки целесообразности применения ЧРП в холодильных установках проведен расчет энергопотребления трёх вариантов холодильных систем, основанный на статистических данных. Статистические данные, использованные при расчетах, получены в результате эксплуатации холодильных систем на объектах заказчика с 2015 года по май 2021.

Введение

Холодные и охлаждаемые хранилища являются важным звеном в обеспечении

продовольственной безопасности населения страны. Обработка продукции низкими температурами является наиболее приемлемым методом консервирования продуктов. Основные вещества, определяющие пищевую ценность продукта, лучше сохраняются при охлаждении, по сравнению с консервированием любым другим способом, в том числе и такие лабильные, как витамины, полифенолы и др. При сравнении по органолептическим показателям: вкусу, аромату, цвету, внешнему виду, – охлажденные (замороженные) продукты мало отличаются от свежих [1].

Каждый продукт требует обеспечения индивидуальных условий хранения с различными показателями температуры и влажности, по-разному реагирует на их изменения. Например, для яблок диапазон температур составляет от 0 до +8 °С, при этом, в зависимости от сорта и срока хранения, он может значительно отличаться. Для осенних сортов наилучшими являются условия: температура от -0,5 до +1 градуса, относительная влажность воздуха 85-95 % [2]. На поддержание влажности следует обращать особое внимание, поскольку вследствие конденсации влаги из воздуха при охлаждении влага будет забираться из хранимого продукта. В случае с яблоками это может приводить к уменьшению массы до 5% от исходной, а также к утрате товарного вида [3].

Во время эксплуатации холодильная установка испытывает колебания температуры окружающей среды. При этом для её эффективного функционирования необходимо поддерживать температуры испарения и конденсации хладагента в определенном диапазоне.

Корреляция нагрузки на компрессор и испаритель с температурой окружающей среды представлена на рис. 1. Снижение потребности в холоде от Q_0 летом до Q_0' зимой ведет к закономерному снижению температуры в холодильной камере от t_r до t_r' . Кривые С отражают увеличение нагрузки на компрессор с ростом температуры кипения t_0 . Кривые Е показывают производительность испарителя, возрастающую с увеличением разности $(t_r - t_0)$ температуры в холодильной камере и температуры кипения хладагента. Одновременно с увеличением производительности испарителя возрастает производительность конденсатора. Точки пересечения кривых С и Е (при зимней и летней эксплуатации) являются точками баланса холодильной системы и указывают на то, что производительность компрессора, конденсатора и испарителя равны. Для оптимальной работы системы необходимо поддерживать её баланс.

Рис. 1. Зависимость нагрузки компрессора и испарителя от температуры окружающей среды

При современных масштабах использования холодильной техники в сельском хозяйстве остро встает проблема снижения энергопотребления. При проектировании холодных хранилищ, наряду с безусловным выполнением всех требований, предъявляемых к условиям хранения продукта, важной задачей является снижение стоимости эксплуатационных расходов на протяжении всего жизненного цикла охлаждаемого хранилища. В ходе анализа литературы в части повышения эффективности систем искусственного холода, применяемых в сельском хозяйстве, выявлена необходимость учета таких аспектов, как соответствие ограждающих конструкций условиям эксплуатации и использование многоуровневых систем регулирования работы холодильной машины [4].

Результаты исследований

Повышение энергоэффективности здания хранилища

Первым этапом в организации энергоэффективного и экономичного хранилища является его правильное проектирование и подбор оборудования. Основным требованием к самой конструкции здания является её максимальная изоляция от внешних воздействий. Естественно, что ограждающие конструкции должны иметь оптимальную теплоизоляцию, позволяющую минимизировать притоки теплоты извне, что снижает нагрузку на холодильный агрегат. В случае, если для хранения продукции в камере планируется поддерживать искусственную газовую среду, камера, вдобавок ко всему, должна быть герметична. Данный нюанс стоит предусмотреть при проектировании, поскольку герметизация помещения на этапе строительства обходится дешевле, чем на введенном в

эксплуатацию объекте. Кроме того, для дооборудования имеющегося склада придется на продолжительное время отказаться от его использования, что также ведёт к убыткам из-за простоя оборудования.

Если хранилище предназначается для глубокой заморозки продукта, например, для шоковой заморозки мяса, строение камеры должно предусматривать дополнительные меры защиты. Для низкотемпературных камер необходима организация подвала под полом основного хранилища. Это обусловлено тем, что от грунта в камеру поступает дополнительное тепло, либо, в случае высокой мощности холодильной установки, может сильно промерзнуть грунт под хранилищем, что ведет к деформации конструкций здания. Оптимальным решением в таком случае является организация подвала высотой не менее метра, через который при помощи вентиляторов будет циркулировать воздух из основной камеры, охлаждая таким образом её пол. Пол самого подвала, в случае, если грунт под ним промерзает, должен быть оснащен системой отопления, поддерживающей температуру на уровне $+1...+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что защищает здание от повреждений и не оказывает негативного влияния на установленную температуру в основной камере [5].

Размещение продукции в охлаждаемом хранилище играет важную роль в её сохранности. Холодные потоки от воздухоохладителя должны беспрепятственно проходить между рядами стеллажей с продукцией и циркулировать по всей камере (рис. 2). Недопустимо слишком плотное размещение, поскольку в глубине слоёв продукта, не омываемых холодным воздухом, возможно образование зон с повышенной температурой, в которых может происходить отпотевание.

Рис. 2. Схема размещения контейнеров с продукцией

Повышение экономичности холодильной системы за счет применения ЧРП компрессора и электронного ТРВ

Важнейшим агрегатом холодильной установки является компрессорный блок с терморегулирующим вентилем. Значительная доля энергопотребления приходится именно на этот узел, в связи с чем повышение его эффективности внесет существенный вклад в повышение экономичности хранилища.

Сравнение расхода электроэнергии и стоимости жизненного цикла проводится для трёх вариантов холодильных систем с применением винтового компрессора:

- без регулирования производительности компрессора с механическим ТРВ;
- без регулирования производительности компрессора с электронным ТРВ;
- плавное (частотное) регулирование производительности компрессора с электронным ТРВ.

Во всех вариантах (табл. 1) холодильной системы применяются одинаковые конденсаторы и испарители. Данные, принятые для расчета холодильной системы, приведены в таблице 2.

Таблица 1. Параметры вариантов холодильных систем

Вариант системы	Тип регулирования производительности компрессора	Тип ТРВ	Компрессорно-конденсаторный агрегат	Воздухоохладитель
ХС 1	Регулирование включено/выключено (0/100%)	Механический TES5-3	OA151-MS-206 $Q_0 = 17,9$ кВт $P = 8,4$ кВт	ОН201-340S1A-55 $T_0 = -7,7$ °C COP = 2,14
ХС 2	Регулирование включено/выключено (0/100%)	Электронный ETS 6-40	OA151-MS-206 $Q_0 = 17,9$ кВт $P = 8,4$ кВт	ОН201-340S1A-55 $T_0 = -7,7$ °C COP = 2,14
ХС 3	Плавное регулирование (30...100%)	Электронный ETS 6-40	OA153-MS-202 $Q_0 = 17,6$ кВт $P = 7,9$ кВт	ОН201-340S1A-55 $T_0 = -7,6$ °C COP = 2,22

Примечания: COP – Коэффициент энергоэффективности

Таблица 2. Исходные данные для проектирования ХС

Холодильный агент	R404A
Холодопроизводительность – Q_0 , кВт	17,5
Температура в камере – T_i , °C	0
Температура кипения – T_0 , °C	-8
Разница температур – dT_1 , K	8
Температура окружающей среды – T_{amd} , °C	32

Для сравнения энергоэффективности приведенных систем (табл. 3, рис. 3) проведем расчет холодильных коэффициентов COP:

$$COP = \frac{Q_0}{P}, \quad (1)$$

где: Q_0 – холодопроизводительность системы, кВт;

P – потребляемая мощность, кВт

Таблица 3. Сравнение коэффициентов энергоэффективности COP

$T_{амд}, ^\circ C$	XC 1			XC 2			XC 3		
	Q_0 , кВт	P , кВт	COP	Q_0 , кВт	P , кВт	COP	Q_0 , кВт	P , кВт	COP
38	16,25	8,88	1,83	16,25	8,88	1,83	15,9	8,39	1,9
32	17,91	8,37	2,14	17,91	8,37	2,14	17,61	7,93	2,22
25	19,77	7,72	2,56	19,77	7,72	2,56	17,57	6,28	2,8
21	20,8	7,32	2,84	21,3	7,13	2,99	17,75	4,65	3,82
15	20,8	7,32	2,84	22,3	6,74	3,31	17,62	3,9	4,52
5	20,8	7,32	2,84	24,68	5,67	4,35	17,75	3,31	5,37

Рис. 3. Сравнение холодильных коэффициентов COP

Следующим шагом в сравнении энергоэффективности является определение годового энергопотребления систем (табл. 4, рис. 4-5).

$$E = \sum ((P_{агр} \cdot dj \cdot K) + (P_{вент} \cdot dj)), \quad \text{кВтч/год} \quad (2)$$

где: $P_{\text{агр}}$ – потребляемая мощность агрегата, кВт;

$P_{\text{вент}}$ – потребляемая мощность вентиляторов воздухоохладителя, кВт;

d_j – продолжительность работы агрегата, часы;

K – коэффициент нагрузки.

Продолжительность работы агрегата (d_j) и коэффициент нагрузки (K) принимаем согласно Directive 2009/125/EC.

Минимальное годовое энергопотребление имеет третий вариант компоновки холодильной системы.

Для сравнения экономичности необходимо определить капитальные затраты (табл. 5) на постройку холодильной системы и стоимость электроэнергии, потребляемой ею [6].

Таблица 4. Энергопотребление холодильных систем

	ХС 1	ХС 2	ХС 3
кВтч/год	56898	51179	38321
кВтч/месяц	4741,5	4264,917	3193,417

Рис. 4. Температура окружающей среды и продолжительность работы агрегата в течение года

Рис. 5. Стоимость жизненного цикла холодильной системы

Таблица 5. Затраты на постройку и эксплуатации системы

XC 1			XC 2			XC 3		
Пункт затрат	Цена, €	Цена, руб.	Пункт затрат	Цена, €	Цена, руб.	Пункт затрат	Цена, €	Цена, руб.
Агрегат OA151-MS- E206	6269	557941	Агрегат OA151-MS- E206	6269	557941	Агрегат OA153-MS- E202	6933	617037
Воздухо- охладитель OH201- 340S1A-G55 VS VT	2509	223301	Воздухо- охладитель OH201- 340S1A-G55 VS VE	2595	230955	Воздухо- охладитель OH201- 340S1A-G55 VS VE	2595	230955
Шкаф управления EBO-13-32- EW974	366	32574	Шкаф управления EBO-13-32- EW974-EVD	923	82147	Шкаф управления EBO-13-32- EW974-EVD	923	82147
Электро- энергия, руб./мес.	21336,8		Электро- энергия, руб./мес.	19192,1		Электро- энергия, руб./мес.	14370,4	

Регулирование производительности конденсаторов воздушного охлаждения

Помимо компрессора, мощным потребителем электроэнергии является конденсатор. В складских холодильных машинах применяются, в основном, воздушные конденсаторы. Прямое потребление электроэнергии связано с работой вентилятора. Также

нагрузка на конденсатор влияет на нагрузку на компрессор и, соответственно, его энергопотребление.

Способы регулирования давления конденсации в конденсаторах с воздушным охлаждением условно можно разделить на следующие группы.

1. Регулирование по воздуху.

1.1. *Ступенчатое регулирование (рис. 6).* Данный принцип основан на попеременном включении и отключении вентилятора, в зависимости от тепловой нагрузки на конденсатор. В качестве индикации пуска или остановки вентилятора используются данные о разности показаний с датчиков давления, установленных на подающем и обратном трубопроводах конденсатора. Однако для регулирования производительности небольших агрегатов с одним вентилятором применение данного способа непрактично. Это связано со значительными колебаниями температуры хладагента, которые вызваны короткими циклами работы вентилятора. Также это негативно сказывается на ресурсе вентилятора вследствие того, что его мотор часто находится в переходных режимах. Применение регулирования приведенным способом целесообразно к применению в случае использования больших конденсаторов с несколькими вентиляторами. Комбинирование различных вариаций включенных и отключенных вентиляторов позволяет добиться удовлетворительной точности регулирования в широком диапазоне рабочих условий [7].

Рис. 6. Схема ступенчатого регулирования производительности конденсатора

1.2. *Регулирование скорости вращения вентиляторов.* Этот способ зарекомендовал себя и активно используется многими производителями. Его предпочтительно использовать в тех случаях, когда важную роль играет низкий уровень

шума вентиляторов. Самым популярным решением для регулирования скорости является введение преобразователя частоты в силовую цепь. Также возможно применение электронно-коммутируемых или шаговых двигателей, однако такое техническое решение на данный момент является более затратным. При этом ЧРП можно ввести в уже существующую холодильную машину без существенного изменения конструкции.

Недостатком регулирования исключительно путем изменения воздушного потока через конденсатор является нестабильность атмосферных условий, которые негативно влияют на точность. Для снижения влияния ветра применяют «ветровые» отражатели либо располагают конденсатор горизонтально [8].

2. Регулирование площади теплообмена (рис. 7) за счет накопления жидкого хладагента в нижней части аппарата.

Суть данного метода состоит в снижении объема, в котором идет конденсация хладагента, за счет этого уменьшается теплоотведение. Соответственно, при высокой нагрузке объем конденсатора заполнен, в основном, газообразной смесью.

Данный метод требует наличия в схеме холодильной установки ресивера, имеющего достаточный объем для компенсации объема хладагента, поступающего из конденсатора. При снижении давления ниже установленного открывается клапан байпасного клапана, вследствие чего газообразный хладагент под давлением поступает в ресивер, ограничивая приток жидкости из конденсатора. В зависимости от давления в ресивере, клапаном с плавной характеристикой автоматически регулируется количество нагнетаемого через байпас пара и количество жидкости в нижней части конденсатора.

Недостатком данного метода является сильное повышение нагрузки на компрессор.

Рис. 7. Схема регулирования производительности конденсатора путем изменения площади поверхности теплообмена

3. Комбинированный метод (рис. 8).

Для достижения оптимальных параметров регулирования производительности конденсатора комбинируют оба вышеперечисленных метода. Это позволяет эффективно поддерживать необходимое давление конденсации при изменении температуры окружающей среды. Например, при температуре снаружи камеры 10°C часть вентиляторов будет выключена, при этом заполненность конденсатора жидкостью составит 50%. Если температура снаружи камеры достигнет значения -18°C , конденсатор будет заполнен жидкостью примерно на 90%, при этом вентиляторы будут отключены.

Рис. 8. Комбинированная схема управления производительностью конденсатора

Выводы

В результате исследования целесообразности применения ЧРП в холодильных машинах получаем четкую зависимость повышения коэффициента энергоэффективности системы. Применение разных способов регулирования производительности позволяет максимально точно и экономично поддерживать необходимые условия для хранения продукции. За счет уменьшения затрат на обслуживание системы на дистанции, несмотря на более высокую изначальную стоимость, энергоэффективная система имеет меньшую стоимость эксплуатации, начиная с 14-го месяца.

Энергоэффективность хранилища закладывается на этапе проектирования, поскольку складывается из показателей эффективности здания хранилища и эффективности холодильной установки. Важно предусмотреть максимальное количество показателей, влияющих на работу системы.

Комбинирование разных способов регулирования производительности холодильной машины позволяет максимально точно и экономично поддерживать

необходимые условия для хранения продукции. Несмотря на более высокую изначальную цену, стоимость эксплуатации энергоэффективной системы, начиная с 14-го месяца, становится меньше. С учетом назначенного срока службы подобных систем (не менее 10 лет) экономия становится весьма существенной.

Список использованных источников

1. Короткий И.А. Изменение теплофизических характеристик ягод облепихи при замораживании / И.А. Короткий, Е.В. Короткая, В.В. Киреев // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 41. – № 2. – С. 108–112.
2. Колесник А.А., Федоров М.А., Осенова Е.Х. Хранение плодов в регулируемой атмосфере. – М.: «Колос», 1973. – 144 с.
3. Головин П. Ключевые факторы проектирования эффективного фруктохранилища. – Режим доступа: http://refportal.com/upload/files/fruit_1.pdf.
4. Большаков С.А. Холодильная техника и технология продуктов питания. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 304 с.
5. Велюханов В. Особенности строительства низкотемпературных складов. – Режим доступа: <https://www.frigodesign.ru/article/osobennosti-stroitelstva-nizkotemperaturnykh-skladov/>.
6. Лекомцев П.Л., Исупов Р.Ю. Повышение экономичности и снижение стоимости жизненного цикла холодильной системы путем применения частотного регулирования привода компрессора и электронного ТРВ // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной году науки и технологии в России «Технологические тренды устойчивого функционирования и развития АПК». – Ижевск, 2021. – С. 114-119.
7. Нуреддин Х.Х. Разработка и исследование холодильной машины с аккумулятором холода: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03. – Махачкала, 2006. – 16 с.
8. Исупов Р.Ю. Способы регулирования производительности конденсаторов воздушного охлаждения промышленных холодильных установок // Материалы XX Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов «Молодые ученые — Агропромышленному комплексу Дальнего Востока». – 2020. – С. 22-27.

Цитирование:

Лекомцев П.Л., Исупов Р.Ю. Повышение энергоэффективности холодного хранилища [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №3 (45). – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/3/st_312.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/20213312>.